

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Liberec 2013

**Martin Kovář**

---

# **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

Fakulta strojní

Studijní program: B2341 – Strojírenství

Studijní obor: 2301R022 – Stroje a zařízení, dopravní stroje a zařízení

## **Vozidlové motory na paliva s obsahem alkoholů**

## **Vehicle engines on gasoline containing alcoholol**

Bakalářská práce

Autor: Martin Kovář  
Vedoucí práce: doc. Ing. Laurin Josef, CSc.  
Konzultant: Michal Vojtíšek, MSc, Ph.D.

V Liberci 23. 5. 2013

---



## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

Jméno a příjmení

**Martin K O V Á Ř**

obor

**B2341 Strojírenství**

zaměření

**2302R022 stroje a zařízení  
dopravní stroje a zařízení**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

### **VOZIDLOVÉ MOTORY NA PALIVA S OBSAHEM ALKOHOLŮ**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Na základě literární rešerše shrňte a kriticky zhodnoťte možnosti uplatnění etanolu a butanolu v palivech pro zážehové a vznětové vozidlové motory, zejména z hlediska vlastností paliv, konstrukčních a provozních parametrů motorů a hospodárnosti provozu.
2. Ve spolupráci s konzultantem bakalářské práce proveďte laboratorní zkoušky vznětového motoru s palivem obsahujícím butanol.
3. Na základě výsledků provedených zkoušek a informací z dostupné literatury vyhodnoťte vliv butanolu v palivu na provozní parametry vznětových motorů.

Forma zpracování bakalářské práce:

Průvodní zpráva - v rozsahu cca 40 stran textu, vč. příloh.

Text celé bakalářské práce včetně příloh bude v elektronické formě přiložen na CD nosiči k tištěnému svazku originálu bakalářské práce.

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

1. Matějovský, M.: Automobilová paliva. Grada Praha, 2005
2. Diesel Engine Management, 4th ed. Robert Bosch GmbH, 2005
3. Rakopoulos, D.C., et al.: Effects of butanol–diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. Energy Conversion and Management 51 (2010) 1989–1997
4. Hansen, A.C.; Zhang, Q.; Lyne, P.W.L.: Ethanol–diesel fuel blends a review. Bioresource Technology 96 (2005) 277–285
5. Publikace dostupné na [www](http://www)

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc. - TU v Liberci, KVM

Konzultant bakalářské práce: Michal Vojtíšek, M.Sc. Ph.D. – TU v Liberci, KVM



Ing. Robert Voženílek, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 1. 2. 2012

Platnost zadání bakalářské práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedeném lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ).  
Termíny odevzdání bakalářské práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.

### **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum      23.5.2013

Podpis      

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval pánům Michalu Vojtíškovi, MSc, Ph.D., Ing. Martinu Pechoutovi a Ing. Martinu Mazačovi za pomoc při měřeních na motoru v laboratoři motorů KVM a doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za cenné rady a připomínky ke zpracování bakalářské práce.

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je analýza možností uplatnění alkoholů v palivech pro vozidlové motory a to konkrétně etanol a butanol. Práce porovnává oba dva zmíněné alkoholy a sleduje možnost používání jak v zážehových, tak i ve vznětových spalovacích motorech. Bakalářská práce je podpořená laboratorní zkouškou vznětového motoru testovaného na různá paliva, z nichž jedno obsahuje butanolu.

**Klíčová slova:** butanol, etanol, alkoholy, nafta, vznětový motor

## ***ABSTRACT***

The aim of this work is to analyze the potential application of alcohol in the fuel for vehicle engines, namely ethanol and butanol. The work compares both mentioned alcohols and of the possibility of use in both gasoline and in diesel engines. The thesis is supported by laboratory test diesel engine tested on different fuels, one of which contains butanol.

**Keywords:** butanol, ethanol, alcohols, diesel, diesel engine

# Obsah

Seznam tabulek .....	9
Seznam obrázků .....	9
Seznam grafů .....	9
<b>1 Úvod .....</b>	<b>10</b>
<b>2 Alkoholy .....</b>	<b>11</b>
2.1 Etanol .....	11
2.1.1 Výroba etanolu .....	12
2.1.2 Vlastnosti etanolu z hlediska použití jako paliva .....	12
2.1.3 Použití etanolu pro zážehové motory .....	14
2.1.4 Zážehové motory FFV .....	15
2.1.5 Zážehové motory na benzin s podílem etanolu .....	16
2.1.6 Použití etanolu jako paliva pro vznětové motory .....	16
2.1.7 Částečná náhrada nafty neupraveným etanolem.....	17
2.1.8 Úplná náhrada nafty etanolovým palivem.....	17
2.2 Butanol .....	19
2.2.1 Výroba butanolu .....	19
2.2.2 Vlastnosti butanolu z hlediska použití jako paliva .....	20
2.2.3 Použití butanolu pro zážehové motory .....	21
2.2.4 Použití butanolu pro vznětové motory.....	22
<b>3 Předpisy a normy pro vznětové motory .....</b>	<b>23</b>
3.1 Metodika měření výfukových emisí.....	23
<b>4 Laboratorní zkoušky .....</b>	<b>25</b>
4.1 Měřicí zařízení .....	26
4.2 Průběh laboratorní zkoušky.....	27
4.3 Druhy použitých paliv při laboratorních zkouškách .....	28
4.4 Výsledky zkoušky .....	29



4.4.1 Vnější otáčková charakteristika .....	29
4.4.2 Porovnání emisí .....	31
<b>5 Závěr .....</b>	<b>37</b>
Seznam použité literatury .....	39

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1: Vlastnosti nafty, benzinu a etanolu [3]</i> .....	13
<i>Tabulka 2: Porovnání zákl. chemických vlastností etanolu, butanolu a BA95 [6]</i> ..	21
<i>Tabulka 3: Osmibodový test dle ISO 8178-4 C1[8]</i> .....	24
<i>Tabulka 4: Hlavní parametry zkušebního motoru</i> .....	25
<i>Tabulka 5: Měřené veličiny, jejich snímače a umístění snímačů na zkušebním motoru</i> .....	27
<i>Tabulka 6: Přístroje pro měření koncentrací plynných emisí ve výfuk. plynech</i> .....	27
<i>Tabulka 7: Sled 31 režimů otáček a zatížení</i> .....	28
<i>Tabulka 8: Složení jednotlivých vzorků paliv</i> .....	29

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Schematické uspořádání motoru FFV [3]</i> .....	15
<i>Obr. 2: Porovnání provozu vznětového motoru na naftu a na etanolové palivo z hlediska emisí [3]</i> .....	18
<i>Obr. 3: Experimentální stanoviště motoru Z1505 s dynamometrem</i> .....	25

## Seznam grafů

<i>Graf 1: Průběhy točivých momentů motoru pro zkoušená paliva</i> .....	30
<i>Graf 2: Průběhy výkonů motoru pro zkoušená paliva</i> .....	31
<i>Graf 3: Emise CH při provozu na palivo MNBe25</i> .....	31
<i>Graf 4: Emise NOx při provozu na palivo MNBe25</i> .....	32
<i>Graf 5: Emise CO při provozu na palivo MNBe25</i> .....	33
<i>Graf 6: Emise CH při provozu na palivo RO</i> .....	33
<i>Graf 7: Emise NOx při provozu na palivo RO</i> .....	34
<i>Graf 8: Emise CO při provozu na palivo RO</i> .....	34
<i>Graf 9: Emise CH při provozu na palivo ROBu10</i> .....	35
<i>Graf 10: Emise NOx při provozu na palivo ROBu10</i> .....	35
<i>Graf 11: Emise CO při provozu na palivo ROBu10</i> .....	36

# 1 Úvod

Sílící tlak na intenzivnější náhradu fosilních paliv, jak ze strany jejich omezených zásob, tak z ekologického hlediska, co se týče škodlivých emisí výfukových plynů, mají alkoholy dobrý předpoklad stát se náhradou fosilních paliv nebo alespoň složkou přimíchávanou k fosilním palivům. Ve většině zemí EU je možné se setkat s výše zmíněnými variantami současně.

Výhoda alkoholů spočívá v jejich výrobě. Dají se vyrobit z přírodních surovin obsahující jednoduché cukry zkvašením pomocí příslušných druhů kvasinek. Pro tento způsob výroby se dají použít suroviny zemědělské nepotravinářské produkce, tzv. biopaliva 2. generace a také odpadní biomasa.

Ačkoli jsou technologické postupy výroby alkoholů známe, tak pro vysoké výrobní náklady, technické a logistické problémy nemohou být zatím pro fosilní paliva rovnocenným konkurentem. Částečně se dá tato nevýhoda odstranit daňovým zvýhodněním alkoholů.

Cílem této bakalářské práce je analýza a hodnocení možností uplatnění etanolu a butanolu v palivech pro zážehové a vznětové vozidlové motory.

V průběhu řešení bakalářské práce byl s ohledem na aktuální potřeby KVM a na situaci v laboratoři motorů upraven bod 2 zadání bakalářské práce ve smyslu rozšíření zkoušených paliv o naftu s 25 % obj. benzínu.

## 2 Alkoholy

Alkoholy byly používány jako palivo již v počátcích motorismu [1]. Velmi často byly alternativou běžných paliv v dobách nejistoty spojených s válkami, v dobách ekonomické deprese anebo kvůli nedostatečně rozvinuté síti čerpacích stanic oproti stavu panujícímu dnes. V současné době nabývají na významu hlediska ochrany životního prostředí, kde alkoholy nabízejí široké možnosti použití, zejména jako paliva pro dopravní prostředky.

Nejčastěji používané alkoholy metanol a etanol, ale dnes již i butanol a alkoholy vyšších řádů, mají jako motorová paliva výhody, ale i nevýhody. Jsou výhodné pro použití v zážehových motorech, po provedení určitých úprav je lze používat i v motorech vznětových.

Specifickou vlastností alkoholů, která z nich dělá vhodné palivo pro zážehové motory, je jejich vysoké oktanové číslo. Oktanové číslo charakterizuje sklon paliva k samovznícení při vysokých tlacích a teplotách. V zážehových motorech dochází k iniciaci hoření směsi paliva se vzduchem za definovaných podmínek a je způsobeno elektrickou jiskrou. Vysoké oktanové číslo v praxi znamená, že ke spálení paliva dojde při vyšším kompresním tlaku. To vede k efektivnějšímu využití paliva a tedy i k jeho menší spotřebě.

Na palivo pro dieselové motory jsou kladeny opačné nároky. Dieselové palivo se musí samo vzněcovat. Palivo je v dieselovém motoru vstřikováno v okamžiku, kdy teplota a tlak ve válci jsou vysoké. Od paliva se požaduje, aby po vstříknutí do válce co nejrychleji shořelo. Mírou schopnosti paliva k samovznícení je cetanové číslo. Čím vyšší je cetanové číslo, tím ochotněji se palivo samo vzněcuje. Normální dieselová paliva mají cetanové číslo kolem 50 jednotek, kdežto cetanové číslo metanolu a etanolu je pouze 5-8 jednotek. Za účelem zvýšení cetanového čísla alkoholu se přidává aditivum.

### 2.1 Etanol

Etanol je druhý nejnižší alkohol [2]. Je to bezbarvá kapalina ostré, ale ve zředění příjemné alkoholické vůně, která je základní součástí alkoholických nápojů. Je snadno zápalný a je proto klasifikován jako hořlavina 1. třídy.

Etanol má nízkou toxicitu a je relativně neškodný v přiměřených dávkách. Je rozpustný ve vodě a přírodní bakterie jej rychle rozkládají na  $\text{CO}_2$  a vodu. K vyloučení

záměny s potravinářským alkoholem musí být palivový etanol denaturován přidáním látek se specifickou chutí či vůní.

### **2.1.1 Výroba etanolu**

Největší část produkce etanolu [2] se připravuje z jednoduchých sacharidů (cukrů) alkoholovým kvašením působením různých druhů kvasinek, především různých šlechtěných kmenů druhu *Saccharomyces cerevisiae*. Používá se k tomu jak cukerného roztoku (o maximální koncentraci 20 %), tak přímo přírodních surovin sacharidy obsahujících, jako jsou např. brambory nebo cukrová třtina. Kvasný proces probíhá podle sumární rovnice:  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$ .

Kvalita takto získaného etanolu je velmi závislá na výchozí surovině. Kvašením vzniká zápara, tj. velmi zředěný vodný roztok etanolu (maximálně 15 %), který vždy obsahuje nežádoucí příměsi, tzv. přiboudliny, zejména vyšší alkoholy (propanol a isopropanol), vícesytné alkoholy (glycerol), ketony (aceton) aj. Čištění se provádí na výkonných destilačních kolonách, přičemž lze získat tzv. absolutní alkohol, obsahující 95,57 % etanolu a 4,43 % vody. Zbytek vody lze odstranit destilací s bezvodým síranem vápenatým nebo oxidem vápenatým, které vodu vážou nebo dlouhodobým působením hygroskopických látek jako např. bezvodého uhličitanu draselného (potaše) nebo bezvodého síranu měďnatého (modré skalice). Těmito postupy lze získat etanol o čistotě až 99,9 %. Jinou metodou získávání co nejčistšího etanolu je tzv. azeotropická metoda, spočívající v destilaci s přidavkem benzínu nebo benzenu, kterou lze získat produkt o čistotě až 99,7 %.

Synteticky se etanol připravuje katalytickou hydratací etenu (etylenu) dle sumární rovnice:  $CH_2=CH_2 + H_2O \rightarrow C_2H_5OH$ . Jako katalyzátor se používá kyselina trihydrogenfosforečná na oxidu křemičitém. Takto připravený etanol má mnohem méně nečistot než kvasný a je tedy kvalitnější.

Další způsob syntetické přípravy spočívá v katalytické hydrogenaci acetaldehydu, který může být průmyslově vyráběn hydratací acetylenu a to dle sumární rovnice:  $HC\equiv CH + H_2 + H_2O \rightarrow CH_3-CH_2OH$ ,  $CH_3-CHO + H_2 \rightarrow CH_3-CH_2OH$ .

### **2.1.2 Vlastnosti etanolu z hlediska použití jako paliva**

Vlastnosti etanolu a možnosti jeho uplatnění jako motorového paliva jsou podrobně popsány v literatuře [3].

Zásadní vlastnosti etanolu jako paliva a standardních motorových paliv (nafta a benzin) jsou uvedeny v tabulce 1.

	Jednotka	Nafta	Benzin	Etanol
Hustota (15° C)	kg.m <sup>-3</sup>	~830	~750	794
Výhřevnost	kWh.kg <sup>-1</sup>	~11,8	~12	7,44
Výhřevnost	kWh.l <sup>-1</sup>	~9,7	~9,1	5,9
Hmot. podíl kyslíku	%	<0,6	<2,7	34,7
Oktanové č. VM	/		91÷100	108
Cetanové číslo	/	>51		7

Tabulka 1: Vlastnosti nafty, benzinu a etanolu [3]

Při úvahách o možnostech náhrady motorových paliv nafty a benzinu etanolem je nutné vzít v úvahu hlavně ty vlastnosti etanolu, které jsou výrazněji odlišné od vlastností nafty a benzinu. Z hlavních odlišných vlastností se jedná o výhřevnost, vznětlivost paliva vyjádřenou cetanovým číslem (CČ), odolnost proti klepání vyjádřenou oktanovým číslem (OČVM) a mazací schopnost. Etanol může způsobit nejen korozi některých součástí, zejména palivového příslušenství motoru, i když tuto nepříznivou vlastnost je možné zmírnit přidáním inhibitorů koroze, ale působí agresivně a poškozuje některé plasty a pryže.

Etanol má v porovnání s naftou i s benzinem nízkou výhřevnost, v porovnání s naftou nízké CČ a velmi malou mazací schopnost a v porovnání s benzinem vysoké OČVM. OČVM samotného etanolu je přibližně 108.

Přidáním etanolu do benzinu BA 95 se OČVM zvyšuje[3] přibližně o 0,24 na 1% přidaného etanolu. Přidáním menšího množství etanolu (přibližně do 30 % obj.) do benzinu dojde ke zvýšení tlaku par. Např. benzin BA 95 má tlak par přibližně 57 kPa a přidáním 5 % etanolu došlo ke zvýšení tlaku par [3] přibližně o 5 kPa.

Z hlediska průběhu spalování v motoru je výhodné určité množství kyslíku, který je v etanolu obsažen, ale jeho vysoký obsah snižuje výhřevnost. I když emise CO<sub>2</sub> nejsou v současné době legislativně sledovanými výfukovými emisemi, bývá jim s ohledem na jejich podíl při vzniku skleníkového efektu věnována pozornost.

Spálením paliva o obsahu 1 kWh energie vznikne z benzinu 269 g CO<sub>2</sub> a z etanolu jen 257 g CO<sub>2</sub>. Přínosem etanolového paliva je přibližně o 5 % nižší produkce

CO<sub>2</sub>, pokud by se nepočítalo ještě se spotřebou CO<sub>2</sub> při fotosyntéze během vegetace rostlin, ze kterých je etanol vyroben.

V literárních pramenech bývá často přeceňován přínos alternativních paliv, tedy i paliv rostlinného původu, pokud jde o výfukové škodliviny. Při hodnocení emisí je třeba vzít v úvahu, že jejich rozdíly při provozu motoru na klasická paliva benzin a na alternativní paliva mohou být způsobeny nejen vlastnostmi paliva, ale i nastavením seřizovacích parametrů motorů, odlišnými režimy chodu motorů při měřeních a dalšími i netechnickými vlivy.

### ***2.1.3 Použití etanolu pro zážehové motory***

- V palivech pro zážehové motory se může etanol uplatnit jako: náhrada benzínu palivem s vysokým obsahem etanolu (až 90 %, 85 % v palivu E85) pro speciálně přizpůsobené zážehové motory
- paliva s různým obsahem etanolu (obvykle až do 85 %) pro motory s elektronickými řídicími systémy umožňujícími provoz i na benzin určené pro „Flexible Fuel Vehicles“ (FFV)
- kyslíkatá a OČ zvyšující složka benzinů - ETBE
- etanol přidáný do benzínu v max. množství zhruba 20 % jako kyslíkatá složka současně zvyšující OČ.

Jak již bylo uvedeno, má etanol v porovnání s benzinem značně nižší výhřevnost, vysokou odolnost proti klepání a vysoké skupenské výparné teplo.

Kvůli nízké výhřevnosti je hmotnostní měrná spotřeba etanolu (g.kWh<sup>-1</sup>) vyšší než spotřeba benzínu, měrná spotřeba tepla (MJ.kWh<sup>-1</sup>) může být u motorů na etanolová paliva, které mají vyšší kompresní poměr, nižší, než bývá u benzinových motorů. Pro vyšší spotřebu etanolu oproti spotřebě benzínu je nutné upravit palivové příslušenství, tj. vstřikovací zařízení tak, aby umožňovalo zhruba 1,5 krát vyšší hmotnostní průtok paliva.

Vysoká odolnost proti klepání umožňuje použití etanolu pro zážehové motory s vyšším kompresním poměrem, než je obvyklé u benzinových motorů. Kompresní poměr je možné zvýšit až na 14:1.

Skupenské výparné teplo etanolu je v porovnání s benzinem vyšší a působí výraznější ochlazení palivové směsi přiváděné do motoru. V porovnání s benzinem se dosáhne vyššího naplnění válců palivovou směsí a tím i vyššího výkonu motoru.

Vysoké skupenské výparné teplo působí problémy při spouštění motoru za nižších teplot. Bývá nutné použít pomocné zařízení pro spouštění za nízkých teplot, případně spouštět motor na benzin.

Pro motory speciálně upravené pro provoz na etanolové palivo se používá směs označovaná E 85, obsahující 85 % etanolu a 15 % benzínu, obsahuje téměř 30 % kyslíku a má OČVM 110.

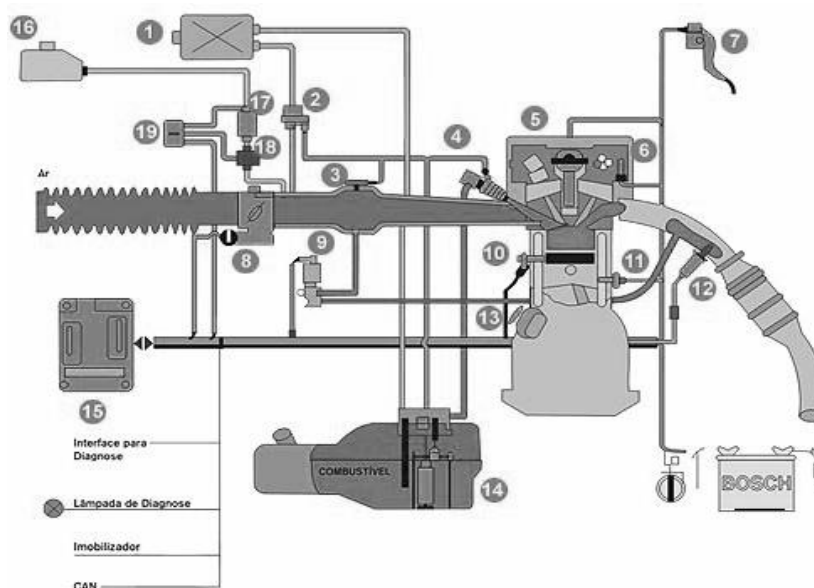
Po přechodu z benzínu na E85 obsah CO ve výfukových plynech přibližně stejný nebo mírně nižší, mírně vzroste obsah HC, přičemž mnohonásobně vzroste podíl aldehydů a mírně klesne obsah  $\text{NO}_x$ .

#### 2.1.4 Zážehové motory FFV

Výhoda motorů FFV je v možnosti prakticky libovolně kombinovat podíl benzínu a etanolového paliva (až do 85 %). Motory FFV umožňují provoz motoru buď jen na benzin, nebo na etanol (max. 85% podíl etanolu) a jejich vzájemné kombinace.

Motor může mít vysoký kompresní poměr, vyhovující i pro benzin. Palivový systém je dimenzován pro provoz na etanolové palivo a přizpůsoben agresivnímu působení etanolu na některé součástky. Podle koncentrace kyslíku ve výfukových plynech získává řídicí jednotka informaci o složení paliva (obsahu etanolu) a tomu přizpůsobí seřizovací parametry, tj. dávkování paliva, předstih zážehu aj. Schematické uspořádání takového motoru s příslušenstvím je na obr. 1.

Vozidla s FFV motory vyrábí řada výrobců, např. VW, Fiat, Renault, Volvo, Saab, Ford. V Evropě je palivo E85 nejvíce používáno ve Švédsku.



Obr. 1: Schematické uspořádání motoru FFV [3]



1- zachycovač palivových par, 2 - ventil zachycovače palivových par, 3 - snímač tlaku, 4 - vstřikovače, 5 - zapalovací cívka, 6 - snímač polohy vačkového hřídele, 7 - pedál akcelerace, 8 – škrticí klapka, 9 – ventil recirkulace výfuk. plynů, 10 - snímač klapání, 11 - snímač teploty, 12 – lambda sonda, 13 - snímač otáček, 14 - palivová nádrž s čerpadlem, 15 – řídicí jednotka motoru, 16 - nádrž na benzin, 17, 18, 19 - benzinový palivový systém pro spouštění motoru

### ***2.1.5 Zážehové motory na benzin s podílem etanolu***

Přidání etanolu do benzínu může přinést problémy způsobené jednak citlivostí etanolu na vodu, jednak relativně vysokým tlakem nasycených par etanolu. Přítomnost určitého množství vody v etanolu může vést k rozvrstvení paliva na benzin a etanol. Nutný je přídavek kosolventů. Ke snížení citlivosti na vodu se v ČSR před druhou světovou válkou přidával do benzinů obsahujících 20 % etanolu benzol.

Řada zkoušek motoru provozovaného na benzin s přídavkem různých množství etanolu (až do 30 %) byla provedena v TUV-ÚVMV Praha [4]. V důsledku nižší výhřevnosti etanolu měl zkoušený motor s objemem válců 1,4 l a výkonem 50 kW mírně vyšší specifickou spotřebu paliva. Příпустné hodnoty plyných výfukových škodlivin nebyly při zkoušce podle předpisu EHK 83-05 překročeny. Při provozu motoru na benzin s vyšším množstvím etanolu výrazněji vzrůstaly výfukové emise oxidů dusíku.

Výsledky zkoušek ukázaly, že motor nemusí být benzínu s podílem etanolu asi do 20 % významněji přizpůsoben. S ohledem na nižší výhřevnost takového paliva zpravidla postačí změna seřízení nebo předimenzování palivového příslušenství.

### ***2.1.6 Použití etanolu jako paliva pro vznětové motory***

V porovnání s naftou má etanol nízkou výhřevnost, nízkou vznětlivost a velmi malou mazací schopnost. Vznětlivost i mazací schopnost lze pomocí vhodných přísad upravit téměř dokonale k možnosti použití etanolu pro vznětové motory, aniž by se muselo zasahovat do konstrukce motorů. S ohledem na nižší výhřevnost etanolu je ale nutné provést úpravy (předimenzování) palivového příslušenství, např. vstřikovacích trysek.

### ***2.1.7 Částečná náhrada nafty neupraveným etanolem***

Etanol bez přísad zvyšujících vznětlivost paliva lze použít u motorů, které pracují současně se dvěma palivy, tj. naftou a etanolem, přičemž se část energetického obsahu náplně motoru přivádí v naftě a část v etanolu. Známá je řada způsobů použití etanolu naftových motorů, např.:

- vstřikování směsi nafty s etanolem do spalovacího prostoru. Potíže bývají se spouštěním studeného motoru, těm lze předejít spouštěním pouze na naftu. Tímto způsobem lze nahradit až 20 % nafty etanolem
- vstřikování nafty i etanolu pomocí dvou vstřikovacích čerpadel, jedno čerpadlo vstřikuje naftu, druhé vstřikuje etanol. Realizace tohoto způsobu vyžaduje značné úpravy související s instalací dvou vstřikovacích systémů a zvýšením kompresního poměru. Lze nahradit až 85 % nafty etanolem
- nasávání směsi etanolu se vzduchem. Palivová směs se tvoří nízkotlakým vstřikováním etanolu do sání motoru. Lze nahradit až 35 % nafty etanolem

Uvedené způsoby využití etanolu vyžadují značné úpravy motoru, jsou technicky náročné a nákladné a nebývají prakticky využívány.

### ***2.1.8 Úplná náhrada nafty etanolovým palivem***

Již zmíněné nepříznivé vlastnosti etanolu, nízké cetanové číslo a nízkou mazací schopnost, ale i korozní agresivitu lze úspěšně ovlivnit přísadami na bázi organických dusičnanů a dusitanů, např. cyklohexylnitratů, izopropylinitratů, oktilnitratů a izopentilnitratů, které vyrábí řada firem. Do etanolu se přidávají podle doporučení výrobce v množství 4 až 10 %.

Možnostmi využití alkoholových paliv pro naftové motory se již v minulosti zabývala řada významných výrobců motorů. Výzkum byl motivován mj. skutečností, že vznětové motory poháněné alkoholovými palivy produkují méně některých výfukových škodlivin, zejména NO<sub>x</sub> a pevných částic, než motory naftové. Výfukové plyny neobsahují sloučeniny síry. Přínosem alkoholových paliv je i nižší množství úsad v motoru.

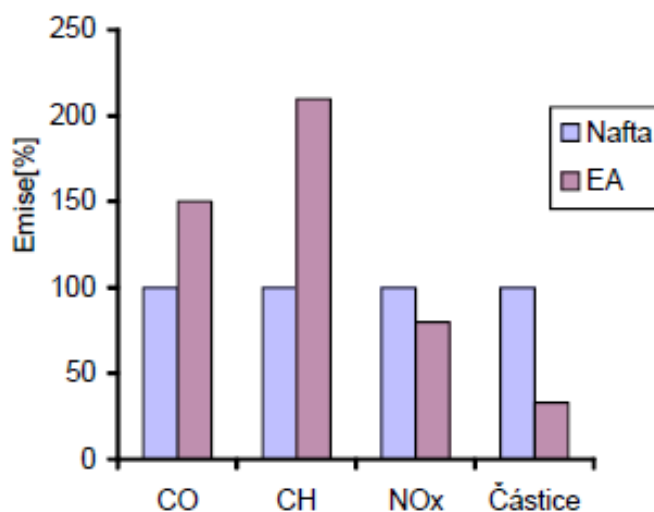
Motor na etanolové palivo je jen málo odlišný od naftového motoru, poněvadž vlastnosti etanolu jsou, až na výhřevnost, upraveny pomocí přísad tak, aby byly blízké vlastnostem nafty. Z odlišností motoru na naftu a motoru na etanolové palivo lze uvést:

- palivová vstřikovací soustava (vstřikovací čerpadlo a trysky) musí být přizpůsobena 1,6 krát nižší výhřevnosti etanolového paliva, než je výhřevnost nafty, tzn., že by měla být schopna dodat téměř 1,7 krát vyšší objemové dávky
- provoz na etanolové palivo vyžaduje jiný počátek vstřiku paliva než provoz na naftu
- motor na etanolové palivo musí být vybaven oxidačním katalyzátorem ke snížení obsahu CO a CH

Pro stejný dojezd vozidla na naftu i na etanolové palivo musí být objem palivové nádrže na etanol téměř 1,7 krát větší než objem nádrže na naftu. Výkonové parametry motoru se přechodem z nafty na etanolové palivo prakticky nezmění.

Následující posuzování úrovně škodlivých emisí motoru na etanolové palivo vychází z výsledků měření provedených na Technické univerzitě v Liberci [3]. Průměrné úrovně výfukových emisí vznětových motorů s oxidačním katalyzátorem na naftu a na etanolová paliva (etanol + 5 % obj. AVOCET výrobce ICI), zjištěné podle předpisu EHK 49, ukazuje graf na obr 2 tak, že za základ 100 % jsou považovány emise motoru při chodu na naftu. Lze konstatovat, že přechod z nafty na etanolové palivo přináší následující změny obsahu škodlivin ve výfukových plynech motoru:

- výrazné snížení obsahu částic
- snížení obsahu NO<sub>x</sub>
- zvýšení obsahu CO
- zvýšení obsahu HC, zejména aldehydů
- odstranění sloučenin síry z výfukových plynů



Obr. 2: Porovnání provozu vznětového motoru na naftu a na etanolové palivo z hlediska emisí [3]

Emise CO<sub>2</sub> nejsou v současné době legislativně sledovanými výfukovými emisemi, ale s ohledem na jejich podíl při vzniku skleníkového efektu se jim věnuje pozornost. Spálením paliva o obsahu 1 kWh energie vznikne z nafty 270 g CO<sub>2</sub> a z etanolového paliva vznikne 257 g CO<sub>2</sub>. Přínosem etanolového paliva je přibližně o 5 % nižší produkce CO<sub>2</sub>, pokud by se nepočítalo se spotřebou CO<sub>2</sub> při fotosyntéze během vegetace rostlin, ze kterých je etanol vyroben.

Etanolové palivo pro vznětové motory nenalezlo dosud příliš široké uplatnění. V Evropě je používáno hlavně ve Švédsku.

## **2.2 Butanol**

Butanol (C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH), v pořadí čtvrtý člen homologické řady alkoholů, představuje z hlediska fyzikálně-chemických vlastností potenciální složky motorových paliv alternativu mnohem vhodnější v porovnání s nižšími polárními homology alkoholové řady – etanolem či metanolem. Předností butanolu je to, že na rozdíl od etanolu může být přidáván do motorových benzinů ve vyšší koncentraci, až 10 obj. %, a lze jej používat bez nutnosti modifikace motoru. Má až o 30 % vyšší energetický obsah v porovnání s etanolem.

Provozní testy, které realizovaly firmy DuPont a BP, prokázaly, že směsné palivo s 16 % obj. butanolu má z hlediska dlouhodobého provozu motorových vozidel stejné vlastnosti jako palivo s 10 % etanolu. [5]

### **2.2.1 Výroba butanolu**

Butanol se vyrábí obdobně jako etanol, tj. fermentací přímo ze zkvasitelných jednoduchých cukrů, tzv. ABE (Aceton-Butanol-Etanol) procesem, za působení mikroorganismu *Clostridium acetobutylicum*. Při klasickém ABE procesu je podíl butanolu v konečném produktu velmi nízký, většinou do 15 % obj., výjimečně kolem 25 % obj.. Směs navíc obsahuje aceton (28 %) a etanol (14 %). Dosažení vyšší koncentrace je limitováno biologickým omezením, protože butanol i při nízké koncentraci cca 1,5 % inhibuje růst a funkci mikroorganismů a zastavuje celý fermentační proces (etanol působí negativně na kvasné mikroorganismy ve fermentované směsi až při koncentraci 15 – 16 % obj.).

Bohužel tak nelze využít velké přednosti butanolu spočívající v omezené mísitelnosti s vodou. Při koncentraci butanolu ve vodné fázi vyšší než 8 % obj. by došlo k separaci kapalného média na dvě vrstvy a surový butanol by mohl být z fermentoru

jednoduše odstraňován ve vysoké koncentraci bez nutnosti energeticky náročného destilačního zahušťování zředěného vodného roztoku. Hlavním výrobním omezením této původní technologie tedy zůstává již zmiňovaná nutnost kontinuálního odstraňování butanolu ze zpracovávaného materiálu už v průběhu výroby.

S další metodou podobnou AEE, ale s vyšší účinností procesu, přišly zásadní změny v technologii výroby butanolu. Zásadní podíl na této metodě má objev nového vhodnějšího druhu mikroorganismů, které ve fermentovaném roztoku působí nejen při vyšší koncentraci butanolu, ale zejména umožňují maximalizovat výtěžky butanolu.

Jedná se o zcela nové mikroorganismy *Clostridium tyrobutyricum* a nově vyšlechtěný druh *Clostridium acetobutylicum*, které v návaznosti na sebe zajišťují optimální produkci butanolu  $4,64 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1}$  a výtěžnost z glukózy 42 – 45 %. První z obou mikroorganismů maximalizuje přeměnu glukózy na kyselinu máselnou (a vodík) a druhý pak konvertuje kyselinu na žádaný butanol. Ve srovnání s původní technologií fermentace ABE tato nová technologie eliminuje tvorbu nežádoucích produktů jako je kyselina mléčná a propionová, aceton, isopropanol, etanol a další.

Schéma výrobního postupu je poměrně jednoduché. Proces je kontinuální, probíhá ve dvou fermentorech, na které navazuje zařízení pro separaci butanolu od ostatního materiálu a velké části vody (odstředivky, polopropustné membrány). Na konečnou destilaci tak přichází butanol jen s 10% obsahem vody, což je energeticky výhodné. Kromě toho v první fázi vzniká i energeticky velmi cenný vodík, který by mohl zlepšit celkovou energetickou výtěžnost procesu až o 18 %. [5]

### **2.2.2 Vlastnosti butanolu z hlediska použití jako paliva**

Vlastnosti butanolu a možnosti jeho uplatnění jako motorového paliva jsou popsány v literatuře [6].

Při úvahách o možnostech případné částečné náhrady benzínu butanolem je nutné vzít v úvahu hlavně ty vlastnosti butanolu, které jsou od vlastností benzínu výrazněji odlišné.

Butanol má v porovnání s benzinem nízkou výhřevnost, vysokou viskozitu, nízký tlak par a vyšší výparné teplo, viz tabulka 2. Oktanové číslo (OČVM) samotného butanolu je přibližně 95. Z hlediska průběhu spalování v motoru je výhodné určité množství kyslíku, který butanol obsahuje, ale jeho přítomnost snižuje výhřevnost paliva. Butanol může způsobit korozi některých součástí, zejména palivového příslušenství motoru. Tuto nepříznivou vlastnost je možné zmírnit přidáním inhibitoru koroze, který

ale nezabrání agresivitě butanolu vůči některým plastům a pryži. Z ekologického hlediska je butanol dobře biologicky odbouratelný a při jeho úniku není ohrožena půda ani voda.

V porovnání s etanolem má butanol vyšší výhřevnost, vyšší bod varu, nižší výparné teplo a nižší oktanové číslo. Na rozdíl od etanolu butanol prakticky nepohlcuje vodu, takže nevzniká separovaná fáze vody s butanolem.

	jednotka	Etanol	Butanol	BA 95
Chemický vzorec	/	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	C <sub>4</sub> H <sub>9</sub> OH	CH <sub>1,87</sub>
Hustota při 15 °C	kg.dm <sup>-3</sup>	0,79	0,81	~ 0,73
Kin. viskoz. při 20 °C	mm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>	1,52	3,64	0,4-0,8
Bod varu	°C	78	118	30-215
Výhřevnost	MJ.kg <sup>-1</sup>	26,8	32,5	42,9
Výparné teplo	MJ.kg <sup>-1</sup>	0,92	0,43	0,36
Tlak par podle Reida	kPa	19,3	18,6	60-90
Obsah kyslíku	% hm	34,7	21,6	< 2,7
OČVM	/	129	96	95

Tabulka 2: Porovnání základních chemických vlastností etanolu, butanolu a BA95 [6]

### 2.2.3 Použití butanolu pro zážehové motory

Benzinové motory mohou spalovat směsi benzinu s butanolem vytvořené v jakémkoliv poměru obou složek. V důsledku nižší výhřevnosti butanolu je spotřeba směsi benzinu s butanolem v motorech vyšší než spotřeba benzinu. V případě, že by směs měla vyhovovat podmínkám ČSN EN 228 "Motorová paliva - Bezolovnaté automobilové benziny - Technické požadavky a metody zkoušení", která připouští obsah kyslíku v benzinu max. do 2,7 %, bylo by možné do benzinu přimíchat až 11, 7 % butanolu. V případě přimíchávání etanolu je to pouze 5 %. Pro palivové směsi s vysokým podílem butanolu a nízkým podílem benzinu jsou potřebné technické změny původního benzinového palivového systému vozidla méně rozsáhlé než v případě směsi s vysokým obsahem etanolu. [6]

Pokud se jedná o porovnání množství škodlivých výfukových emisí oxidu uhelnatého, uhlovodíků a oxidů dusíku při provozu motoru na benzin a při provozu na

směsi benzínu s butanolem, jsou výsledky zkoušek provedených na různých motorech a publikované jednotlivými autory odlišné. Přesto ukazují, že přimíchání 11,7 % butanolu do benzínu výsledky emisních testů výrazněji neovlivní.

#### ***2.2.4 Použití butanolu pro vznětové motory***

Butanol má oproti motorové naftě nízkou výhřevnost, nízkou vznětlivost a malou mazací schopnost. Vznětlivost i mazací schopnost lze pomocí vhodných přísad upravit. S ohledem na nižší výhřevnost butanolu je nutné počítat s vyšší spotřebou butanolu oproti motorové naftě a provést případně úpravy (předimenzování pro větší průtok) palivového příslušenství. Butanol může způsobit korozi některých součástí, zejména palivového příslušenství motoru. Tuto nepříznivou vlastnost je možné zmírnit přidáním inhibitoru koroze, který ale nezabrání agresivitě butanolu vůči některým plastům a pryži.

V současné době se jeví jako nejvhodnější možnost použití butanolu jako složky přimíchávanou do motorové nafty. Díky svým vlastnostem může butanol nahrazovat až 40 % nafty bez nutnosti úprav vznětového motoru. Jak ukazuje literatura [7] i v případě použití vysokotlakého vstřikování paliva jako je Common Rail, kde při použití směsi nafty + 40 % obj. butanolu nedochází k výrazným poklesům výkonu a točivého momentu ve srovnání s provozem na naftu.

Směsi motorové nafty a butanolu (až 40% obj. butanolu) jsou svými vlastnostmi hodně podobné motorové naftě. Odlišnost nastává v mazivosti. Při vyšších koncentracích než 20 % obj. butanolu klesá výrazně mazivost směsi.

Při provozu motoru na palivo obsahující butanol jsou emise uhlovodíků (CH) výrazně nižší ve všech zkušebních režimech ve srovnání s provozem na motorovou naftu, viz graf 9, kdež to emise oxidů uhelnatého (CO) se snižují při stoupajícím zatížení motoru, viz graf 11. Emise oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>) jsou ve všech zkušebních režimech motoru při provozu na palivo obsahující butanol mírně vyšší než při provozu motoru na motorovou naftu, viz graf 10.

### 3 Předpisy a normy pro vznětové motory

Současný trend „normalizace“ se nevyhnul ani pístovým spalovacím motorům. V dnešní době je uplatnění spalovacích motorů velice různorodé. Asi největší zastoupení spalovacích motorů je v dopravě. Nejenom v dopravě, ale i v zemědělství a v jiných aplikacích, tam všude pracují pístové spalovací motory. Díky masovému rozšíření motorů po celém světě a všude přítomným slovům jako životní prostředí a skleníkové plyny bylo potřeba sjednotit metodiku zkoušení a posuzování vlivu dopadu na přírodu.

V důsledku negativních vlivů provozu spalovacího motorů na životní prostředí a na zdraví člověka začaly být uplatňovány tzv. emisní limity, které musí každý vyrobený spalovací motor splňovat. Tyto limity jsou pro Českou Republiku, resp. pro celou Evropskou unii stanovovány Evropskou hospodářskou komorou (EHK).

Pro zemědělské traktory se používá směrnice 2000/25/EC s novelou 2005/13/EC o opatřeních proti emisím plyných znečišťujících látek a znečišťujících částic z motorů používaných k pohonu zemědělských a lesnických traktorů. Emisní limity se vyhlášují pro stanovený rozsah výkonu motoru a období platnosti a uvádí se v  $\text{g.kW}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Limitovanými emisemi jsou oxid uhelnatý CO, uhlovodíky, resp. těkavé organické sloučeniny HC, suspendované částice PM a oxidy dusíku NO<sub>x</sub>. Mimo těchto limitů maximálního množství emisí ve výfukových plynech jsou vydány i směrnice, určující metodiku měření těchto emisí. Tato metodika je popsána ve směrnici 97/68/EC při použití vznětového motoru, jehož netto výkon (80/1269/EEC) je nejméně 19 kW, avšak není větší než 560 kW, a který je provozován s měnícími se otáčkami spíše než s otáčkami stálými. [8]

#### 3.1 Metodika měření výfukových emisí

Metodika měření zahrnuje dvě základní zkoušky k zjištění příslušných hodnot a to:

- cyklus NRSC (Non-road steady cycle) – stacionární zkouška nesilničních pojízdných strojů
- cyklus NRTC (Non-road transient cycle) – dynamická zkouška nesilničních pojízdných strojů

V případě zkoušek NRSC se používá metodika tzv. bodového testu, při kterém se zatěžuje samostatný motor na zkušební stolici na různé otáčky a točivý moment. Každý z bodů má svoji váhu vyjádřenou konstantou (váhový faktor), kterou se násobí naměřené hodnoty emisí. Váhové faktory udávají podíl, jakým příslušný režim přispívá



do celkového výsledku testu a tím i důležitost daného režimu v testu. Přehled o velikosti momentů, otáček, váhových konstantách je uveden v tabulce 3. V případě zkoušení traktorů se používá metodika tzv. 8 bodového testu. Tento cyklus plně odpovídá normě ISO 8178-4 C1 (pro motory „Off road vehicles“ s proměnlivým zatížením a otáčkami).

Číslo režimu	Otáčky motoru	Zatížení (%)	Váhový faktor
1	Jmenovité	100	0,15
2	Jmenovité	75	0,15
3	Jmenovité	50	0,15
4	Jmenovité	10	0,1
5	Mezilehlé	100	0,1
6	Mezilehlé	75	0,1
7	Mezilehlé	50	0,1
8	Volnoběžné	-	0,15

*Tabulka 3: Osmibodový test dle ISO 8178-4 C1[8]*

Jmenovitými otáčkami se rozumějí maximální otáčky, které dovoluje regulátor při plném zatížení, podle údaje výrobce. Mezilehlé otáčky se stanovují na základě otáček při nejvyšším točivém momentu ve vztahu k otáčkám jmenovitým. Jedna z možností je, že to mohou být otáčky při maximálním točivém momentu, pokud leží mezi 60 – 75 % jmenovitých otáček motoru. Další možnosti jsou blíže specifikovány v normě 97/68/EC. [8]

## 4 Laboratorní zkoušky

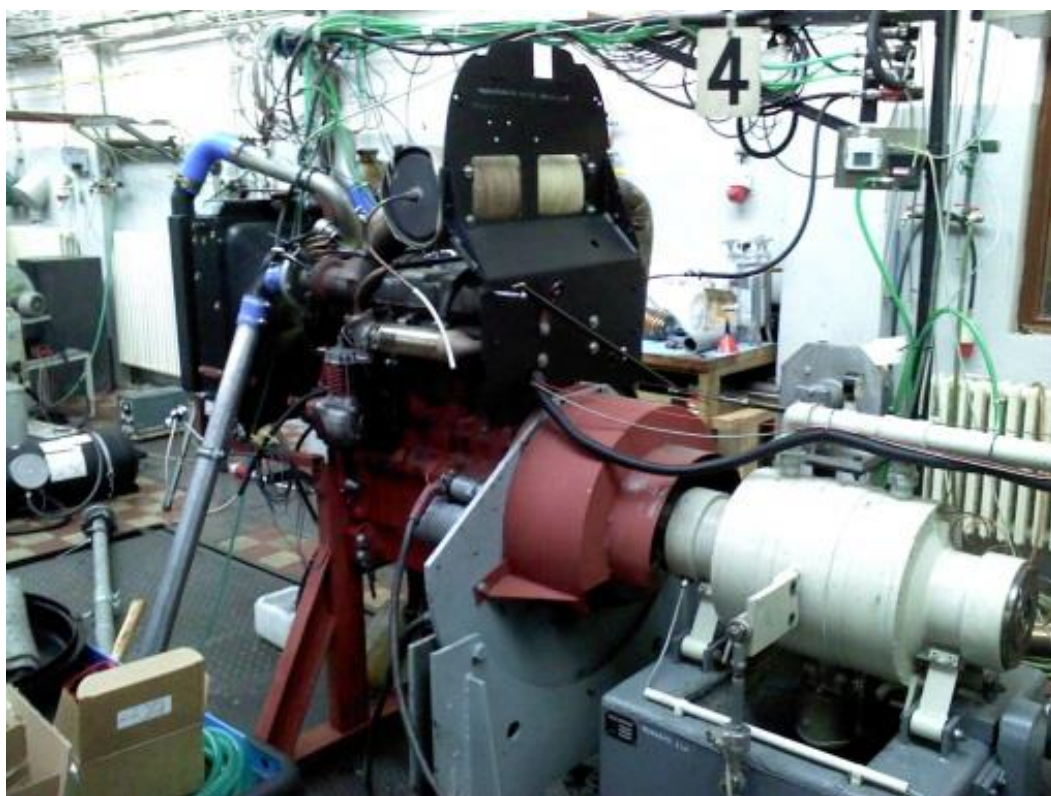
Laboratorní zkoušky vznětového motoru se zkoumanými palivy byly provedeny v laboratoři pístových spalovacích motorů katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci. Zkoušky byly uskutečněny na vznětovém motoru ZETOR 1505, jehož hlavní technické a provozní parametry uvádí tabulka 4.

Čtyřválcový čtyřdobý turbodmychadlem přeplňovaný motor s přímým vstřikem paliva je vybaven mechanicky řízeným řadovým vstřikovacím čerpadlem Motorpal (Jihlava, ČR) a mezichladičem plnicího vzduchu. Motor nemá katalytický reaktor.

Vrtání válců	105 mm
Zdvih pístů	120 mm
Objem válců	4 156 cm <sup>3</sup>
Kompresní poměr	17,8
Max. výkon	90 kW při 2200 min <sup>-1</sup>

*Tabulka 4: Hlavní parametry zkušebního motoru*

Motor je instalován na zkušebním stanovišti s hydraulickým dynamometrem SCHENCK Dynabar 630-IE, viz obr. 3.



*Obr. 3: Experimentální stanoviště motoru Z1505 s dynamometrem*

#### 4.1 Měřicí zařízení

V tabulce 5 jsou uvedeny též příslušné snímače měřených veličin a umístění snímačů na motoru. V tabulce 6 jsou údaje o přístrojích pro měření plynných výfukových emisí.

	Měřená veličina	Měřidlo	Umístění
1	Teplota nasávaného vzduchu	Odporový teploměr Pt100+ převodník DM 300/1-6	Před čelní clonkou
2	Teplota plicího vzduchu za dmychadlem	Odporový teploměr Pt100+ převodník DM 300/1-6	80 mm za výstupním průřezem z dmyhadla
3	Teplota plicího vzduchu za mezichladičem	Odporový teploměr Pt100+ převodník DM 300/1-6	230 mm před vstupem vzduchu do sběrného plicího potrubí
4	Teplota chladicí kapaliny na výstupu z motoru	Odporový teploměr Pt100+ převodník DM 300/1-6	Boční stěna hlavy válců 1. a 4. Válec
5	Teplota mazacího oleje	Odporový teploměr Pt100+ převodník DM 300/1-6	Olejová vana motoru
6	Teplota výfukových plynů za turbínou	Termočlánek FeCo + ukazatel 0-800 °C, v.č. 1750837	220 mm za výstupní přírubou turbíny
7	Tlaková difference na čelní clonce	Kapalinový tlakoměr s náplní lihu $\rho = 807 \text{ kg/m}^3$	Čelní hrana clonky
8	Podtlak plicího vzduchu před dmychadlem	Kapalinový tlakoměr s náplní H <sub>2</sub> O	450 mm před vstupem do dmyhadla
9	Přetlak plicího vzduchu za dmychadlem	Kapalinový tlakoměr s náplní Hg	320 mm za výstupem z dmyhadla
10	Přetlak výfukových plynů za turbínou	Kapalinový tlakoměr s náplní H <sub>2</sub> O	370 mm za výstupem z turbíny
11	Točivý moment motoru	Vážicí zařízení dynamometru, Transporta Chr., v.č.637748	Dynamometr
12	Otáčky motoru	Tachodynamo dynamometru 2VD 110/6 + Meret OC 7110	Dynamometr
13	Koncentrace složek plynných emisí CO, NO <sub>x</sub> , T.HC, O <sub>2</sub>	Měřicí analyzátory složek emisí	Odběrová sonda 200 mm před tlumičem hluku výfuku

14	Koncentrace tuhých částic a CO <sub>2</sub>	Měřicí systém s minitunelem, analyz. CO <sub>2</sub>	Odběrová sonda 1000 mm za tlumičem hluku výfuku
15	Spotřeba paliva	El. váha Sartorius IC 64, stopky	V přívodní větvi rozvodu paliva
16	Relativní vlhkost	Psychrometr PM8211	Před čelní clonkou
17	Barometrický tlak	Staniční barometr	V laboratoři
18	Přetlak výfukových plynů za tlumičem	Kapalinový tlakoměr s náplní H <sub>2</sub> O	75 mm za tlumičem hluku výfuku

Tabulka 5: Měřené veličiny, jejich snímače a umístění snímačů na zkušebním motoru

Složka	Přístroj	Rozsah	Odchylka
HC	HB FIDAS 2T	0-300 ppm C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	± 1%
NO <sub>x</sub>	BECKMAN 951 A (CLA)	0-1000 ppm	± 1%
CO	HB URAS 3E	0-1000 ppm	± 1%

Tabulka 6: Přístroje pro měření koncentrací plyných emisí ve výfukových plynech

## 4.2 Průběh laboratorní zkoušky

Zkoušky motoru s jednotlivými palivy byly prováděny v 31 režimech otáček a zatížení motoru uvedených v tabulce 7. Zkušebních 31 režimů otáček a zatížení se skládá z ohřívací a stabilizační sekvence, vnější otáčkové charakteristiky, 8 režimového testu a závěrečnou částí podobnou 8 režimovému testu s váhovými faktory C2 [8]. Viz tabulka 7.

Číslo režimu	Otáčky [min <sup>-1</sup> ]	Zatěžovací moment [Nm]	
1	1480	225	Ohřívací a stabilizační sekvence
2	1480	520	
3	1000	0	
4	1000	320	Body vnější otáčkové charakteristiky
5	1000	320	
6	1120	510	
7	1240	530	
8	1360	530	

9	1480	520	Body vnější otáčkové charakteristiky
10	1600	500	
11	1720	480	
12	1840	450	
13	1960	420	
14	2080	400	
15	2200	380	8 režimový test
16	2200	330	
17	2200	247	
18	2200	165	
19	2200	33	
20	1480	450	
21	1480	337	
22	1480	225	
23	780	0	Doplňující sekvence podobná 8 režimovému testu s váhami C2
24	2200	88	
25	2200	88	
26	1480	520	
27	1480	337	
28	1480	225	
29	1480	112	
30	1480	45	
31	780	0	

Tabulka 7: Sled 31 režimů otáček a zatížení

### 4.3 Druhy použitých paliv při laboratorních zkouškách

Jako paliva byla použita běžná motorová nafta (dle ČSN EN 590) a běžný bezolovnatý automobilový benzin (dle ČSN EN 228). Řepkový olej odpovídá palivové kvalitě (dle DIN V 51605, od firmy Fabio Produkt, Holín). Byl použit butanol s čistotou min. 99,5 % od firmy Lach-Ner, s.r.o. [9]

K měření byly připraveny čtyři vzorky paliv, viz tabulka 8:

Číslo vzorku paliva	Složení vzorku paliva	Označení vzorku paliva
1	motorová nafta + benzín 25% obj.	MNBe25
2	motorová nafta	MN
3	řepkový olej	RO
4	řepkový olej + butanol 10% obj.	ROBu10

*Tabulka 8: Složení jednotlivých vzorků paliv*

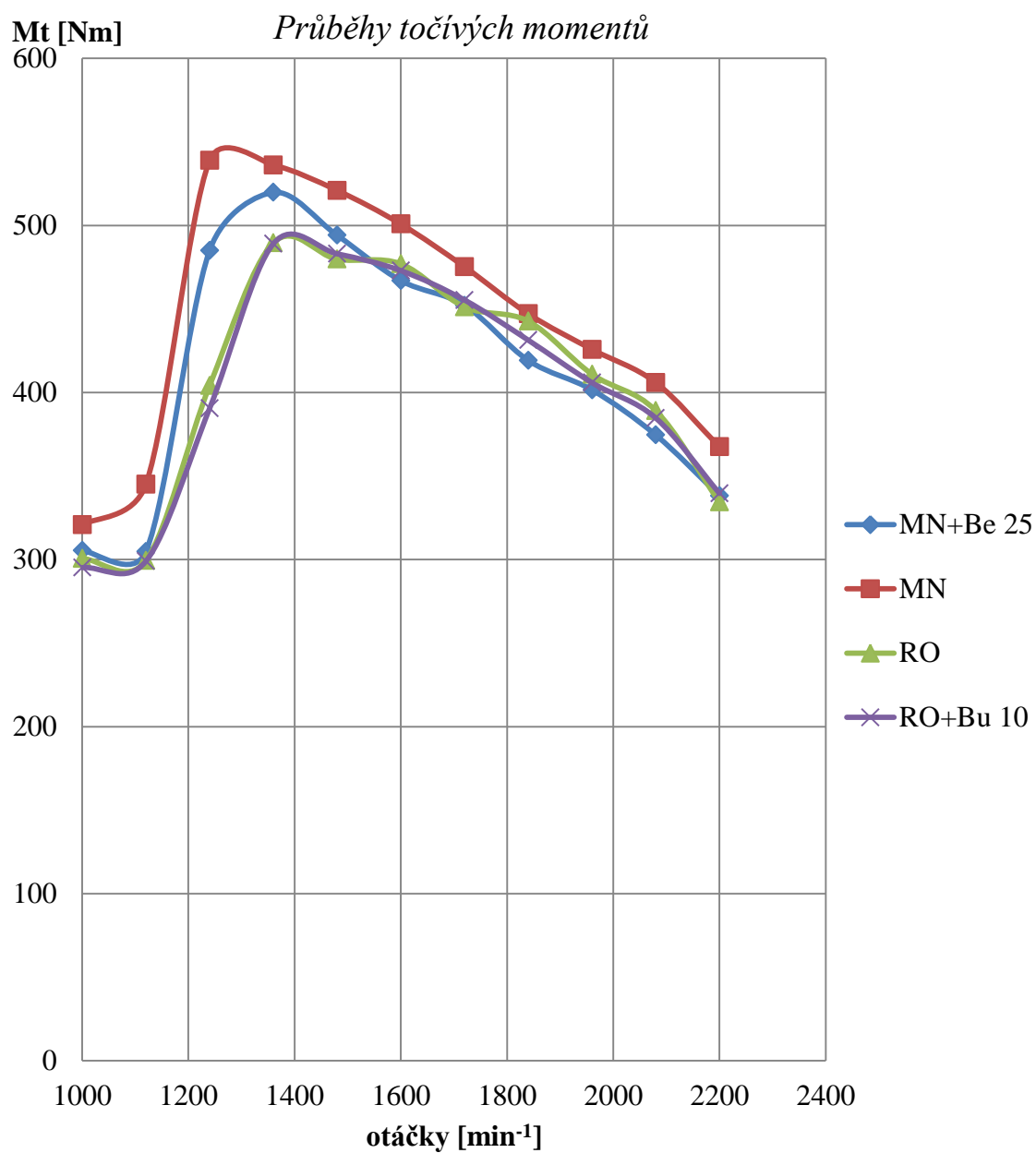
#### **4.4 Výsledky zkoušky**

Naměřené hodnoty emisí pro jednotlivé vzorky paliv jsou uspořádány do bublinových grafů, viz níže. Bublinové grafy jsou vytvořeny jako porovnávací. Tzn., že se porovnávají naměřené hodnoty emisí jednotlivých vzorků paliv vůči naměřeným hodnotám emisí referenčního paliva. Za referenční palivo je vzata motorová nafta. Naměřené hodnoty emisí jsou vyjádřeny v přírůstku/poklesu % vůči naměřeným hodnotám referenčního paliva a tomu i odpovídá velikost bublin v bublinových grafech.

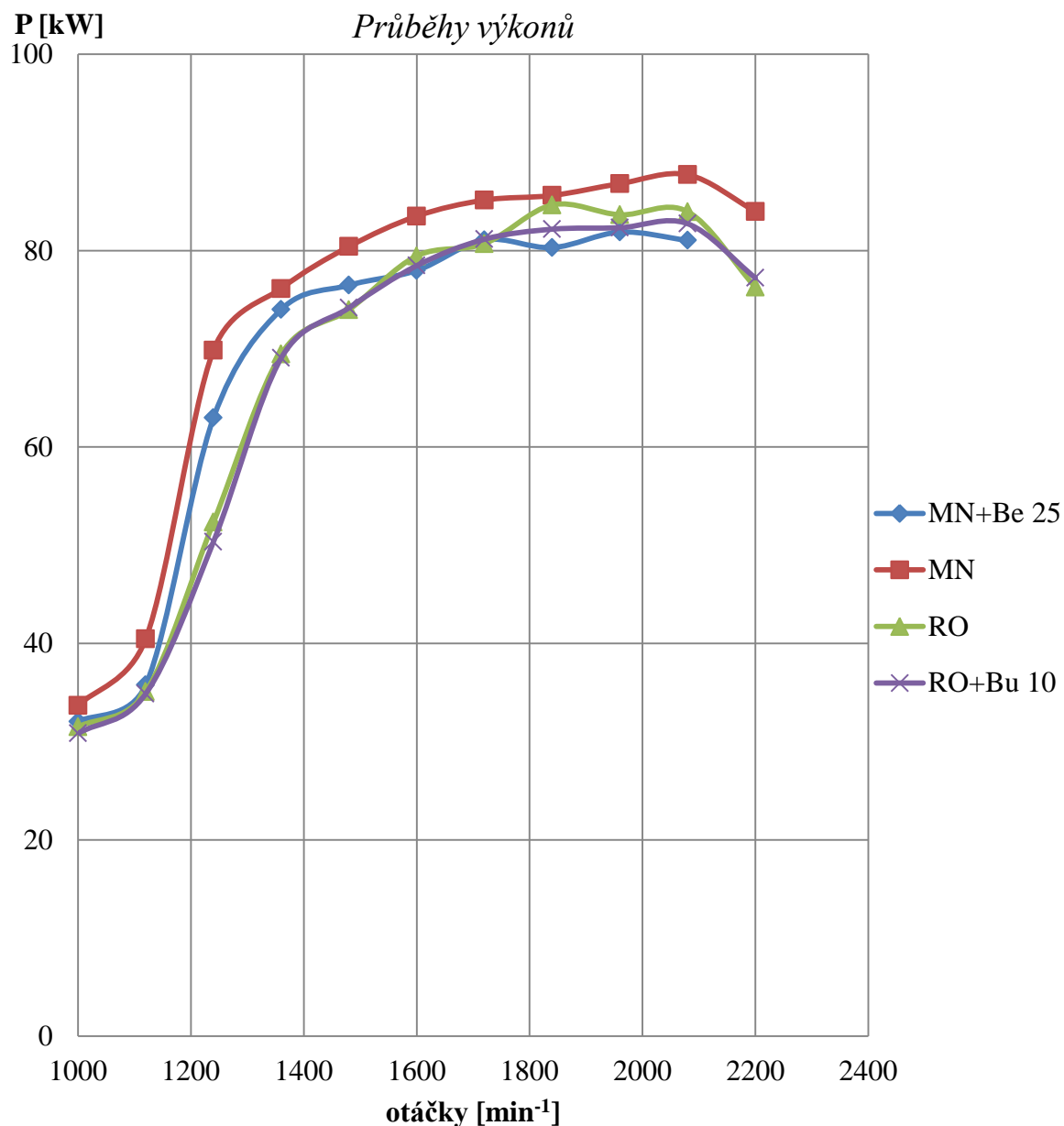
##### **4.4.1 Vnější otáčková charakteristika**

Při plné dávce paliva byly změřeny vnější otáčkové charakteristiky motoru pro všechny připravené vzorky paliv. Průběhy výkonů a točivých momentů motoru jsou zachyceny v otáčkových charakteristikách v grafech 1 a 2, viz níže.

Z průběhů točivých momentů motoru v grafu 1 je patrné, že při provozu na paliva MNBe25, RO a ROBu10 v porovnání s provozem na palivo MN jsou nižší točivé momenty motoru a tedy i výkony motoru viz graf 2. Podobný průběh křivek točivých momentů a výkonů motoru měl provoz na paliva RO a ROBu10, ale zároveň v porovnání s provozem na palivo MNBe25 byl točivý moment a tedy i výkon nižší. Největší rozdíl točivých momentů a výkonů motoru při provozu na paliva MNBe25, RO a ROBu10 ve srovnání s provozem na palivo MN nastává přibližně v rozmezí otáček motoru 1000 až 1400 min<sup>-1</sup>.



*Graf 1: Průběhy točivých momentů motoru pro zkoušená paliva*

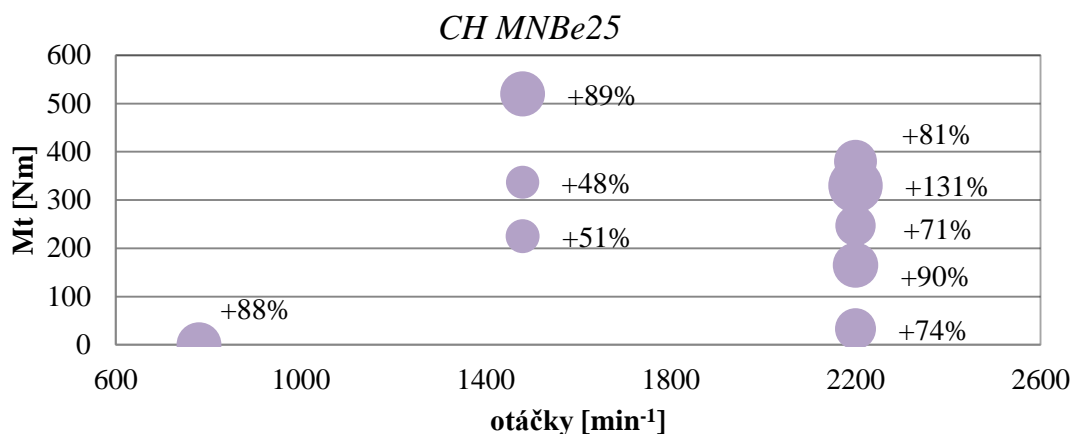


Graf 2: Průběhy výkonů motoru pro zkoušená paliva

#### 4.4.2 Porovnání emisí

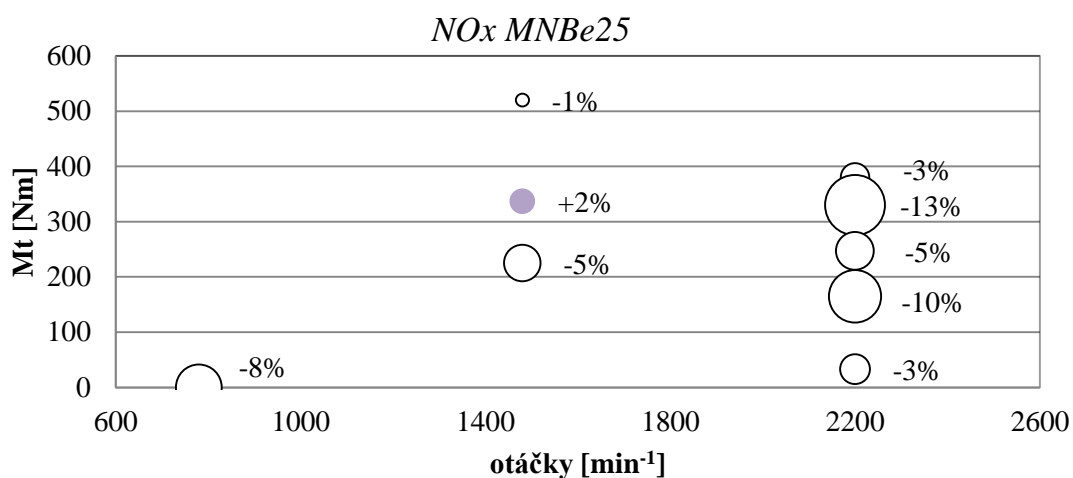
Při provozu motoru na palivo MNBe25 byly v porovnání s provozem na palivo MN koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech při všech režimech výrazně vyšší, a to o 89 % při režimu č. 20 a až o 131 % při režimu č. 16, viz graf 3.





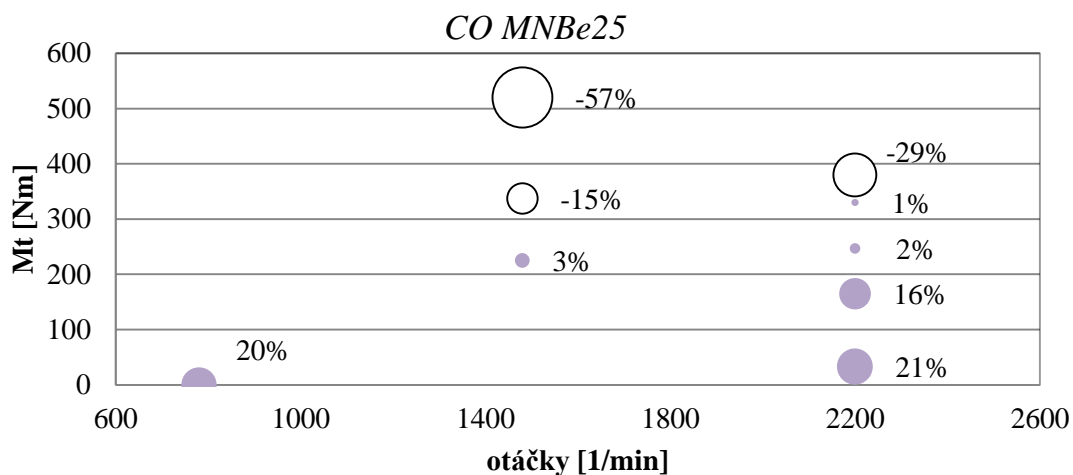
Graf 3: Emise CH při provozu na palivo MNBe25

Koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech byly při provozu motoru na palivo MNBe25 téměř ve všech režimech nižší s výjimkou režimu č. 21, kde je 2% nárůst oxidů dusíku oproti provozu motoru na palivo MN, viz graf 4.



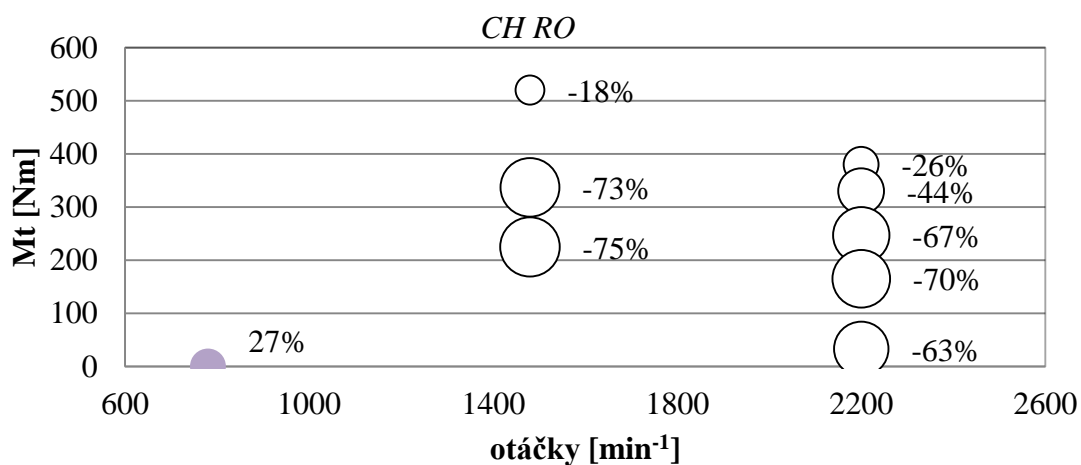
Graf 4: Emise NOx při provozu na palivo MNBe25

Koncentrace oxidů uhelnatého dle grafu 5 při provozu motoru na palivo MNBe25 ve srovnání provozu motoru na palivo MN příznivě klesají s vyšším zatížením (č. režimu 16, 20, 21) o 15 – 57 % a naopak při nižším zatížení stoupají (č. režimu 18, 19, 20, 22) o 16 – 21 %.



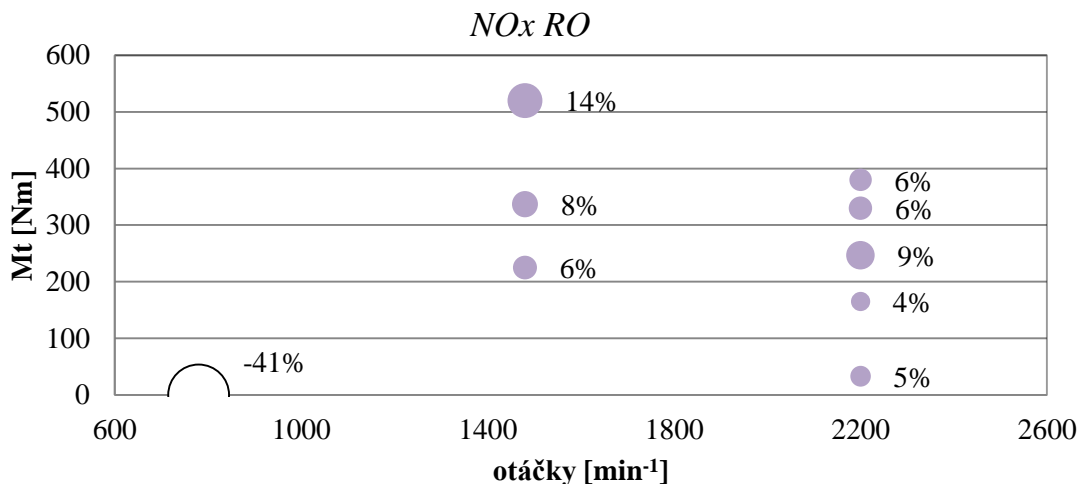
*Graf 5: Emise CO při provozu na palivo MNBe25*

Při provozu motoru na palivo RO koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech v porovnání s provozem motoru na palivo MN klesají o 18 – 75 % v celém režimu otáček. Jenom při volnoběhu dochází k přírůstku koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech a to o 27 %, viz graf 6.



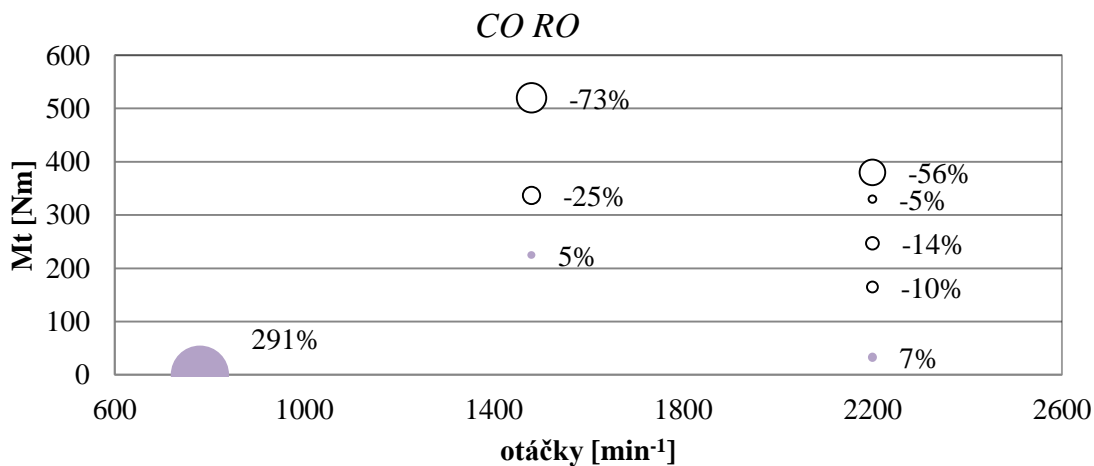
*Graf 6: Emise CH při provozu na palivo RO*

Koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech byly při provozu na palivo RO ve všech režimech vyšší přibližně o 7 % než při provozu motoru na palivo MN, viz graf 7.



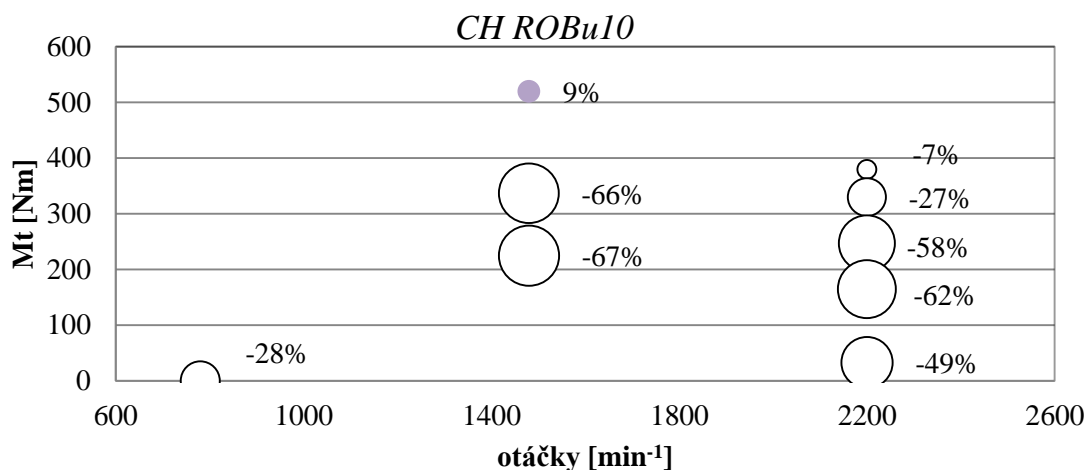
*Graf 7: Emise NO<sub>x</sub> při provozu na palivo RO*

Koncentrace oxidu uhelnatého ve výfukových plynech vykazuje při provozu motoru na palivo RO značný pokles oproti provozu na palivo MN a to v případě režimu č. 20 až o 73 %. Téměř až trojnásobně zvýšená koncentrace oxidu uhelnatého se vyskytuje v režimu volnoběhu, viz graf 8.



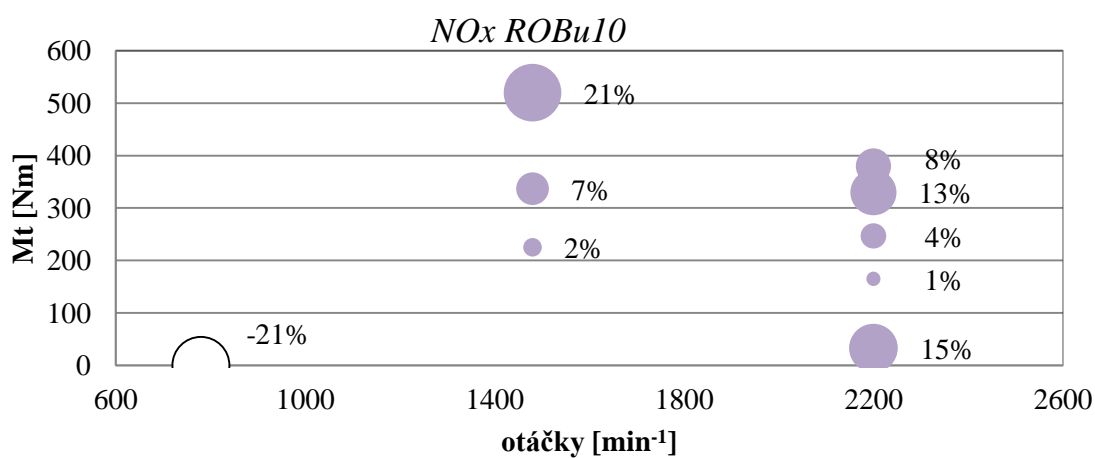
*Graf 8: Emise CO při provozu na palivo RO*

Při zkoušení posledního vzorku paliva ROBu10 se koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech téměř při všech režimech snižují ve srovnání s provozem motoru na palivo MN. U režimu č. 22 je to až o 67% oproti provozu motoru na palivo MN, viz graf 9.



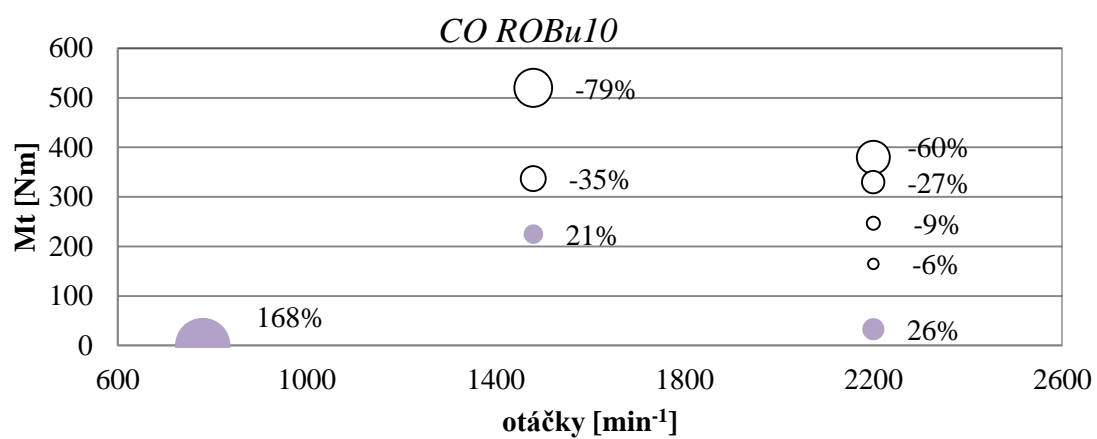
Graf 9: Emise CH při provozu na palivo ROBu10

Za to koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech při provozu motoru na palivo ROBu10 se ve všech režimech zvyšují oproti provozu motoru na palivo MN s výjimkou volnoběhu, kde koncentrace oxidů dusíku klesají o 21 %, viz graf 10.



Graf 10: Emise NOx při provozu na palivo ROBu10

Koncentrace oxidů uhelnatého ve výfukových plynech při provozu motoru na palivo ROBu10 klesají s rostoucím zatížením (č. režimu 16, 20) o 60 a 79 % oproti provozu motoru na palivo MN, viz graf 11.



*Graf 11: Emise CO při provozu na palivo ROBu10*

## 5 Závěr

V předložené bakalářské práci jsou popsány a hodnoceny vlastnosti alkoholových motorových paliv etanolu a butanolu včetně podmínek a možností jejich použití k pohonu zážehových a vznětových vozidlových motorů.

S ohledem na aktuální potřeby KVM a na situaci v laboratoři motorů byly na vznětovém motoru ZETOR 1505 v rámci této bakalářské práce provedeny zkoušky s následujícími čtyřmi vzorky paliv:

- motorová nafta (MN)
- motorová nafta + benzín 25% obj. (MNBe25)
- řepkový olej (RO)
- řepkový olej + butanol 10% obj. (ROBu10).

Výsledky zkoušek ukázaly, že výkonové parametry motoru (točivý moment a výkon motoru) byly při režimech vnější otáčkové charakteristiky nejvyšší při provozu na motorovou naftu (MN) a nejnižší při provozu na řepkový olej s 10% obj. butanolu (ROBu10).

Emisní parametry (CH, NO<sub>x</sub> a CO) u testovaných paliv dopadly takto:

- při provozu motoru na palivo motorová nafta + 25 % obj. benzínu (MNBe25) byly v porovnání s provozem na palivo motorová nafta (MN) koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech při všech režimech výrazně vyšší, viz graf 3
- koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech byly při provozu motoru na palivo motorová nafta + 25 % obj. benzínu (MNBe25) téměř ve všech režimech nižší oproti provozu motoru na palivo motorová nafta (MN), viz graf 4
- koncentrace oxidů uhelnatého dle grafu 5 při provozu motoru na palivo motorová nafta + 25 % obj. benzínu (MNBe25) ve srovnání s provozem motoru na palivo motorová nafta (MN) příznivě klesají s vyšším zatížením a naopak při nižším zatížení stoupají
- při provozu motoru na palivo řepkový olej (RO) koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech v porovnání s provozem motoru na palivo motorová nafta (MN) klesají o 18 – 75 % v celém zkoušeném rozsahu otáček. Jenom při volnoběhu dochází k přírůstku koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech a to o 27 %, viz graf 6

- koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech byly při provozu na palivo řepkový olej (RO) ve všech režimech vyšší přibližně o 7 % než při provozu motoru na palivo motorová nafta (MN), viz graf 7
- koncentrace oxidu uhelnatého ve výfukových plynech vykazují při provozu motoru na palivo řepkový olej (RO) značný pokles oproti provozu motoru na palivo motorová nafta (MN). Téměř až trojnásobně zvýšená koncentrace oxidu uhelnatého se vyskytuje v režimu volnoběhu, viz graf 8
- při provozu motoru na palivo řepkový olej + 10 % obj. butanolu (ROBu10) se koncentrace uhlovodíků ve výfukových plynech téměř při všech režimech snižují oproti provozu motoru na palivo motorová nafta (MN), viz graf 9
- koncentrace oxidů dusíku ve výfukových plynech při provozu motoru na palivo řepkový olej + 10 % obj. butanolu (ROBu10) se ve všech režimech zvyšují oproti provozu motoru na palivo motorová nafta (MN) s výjimkou volnoběhu, kde koncentrace oxidů dusíku klesají o 21 %, viz graf 10
- koncentrace oxidu uhelnatého ve výfukových plynech při provozu motoru na palivo řepkový olej + 10 % obj. butanolu (ROBu10) klesají s rostoucím zatížením oproti provozu motoru na palivo motorová nafta (MN), viz graf 11.

Na základě informací získaných z odborné literatury i podle výsledků vlastních měření lze konstatovat, že přidání butanolu do motorové nafty způsobuje v porovnání s provozem na motorovou naftu snížení výkonových parametrů motoru a ve výfukových plynech snížení obsahu pevných částic, oxidu uhelnatého a uhlovodíků a zvýšení obsahu oxidů dusíku.

## Seznam použité literatury

- [1] PANÁČEK, R., KROUPA, V. Alkoholová paliva[online]. 21. 5. 2013. URL:  
<[http://www.tc.cz/files/istec\\_publications/alkoholova-paliva.pdf](http://www.tc.cz/files/istec_publications/alkoholova-paliva.pdf)>
- [2] WIKIPEDIA. Ethanol[online]. 21. 5. 2013. URL:  
<<http://cs.wikipedia.org/wiki/Ethanol>>
- [3] LAURIN, J. Kvasný líh v motorových palivech[online]. 21.5.2013. URL:  
<[http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2006/2006\\_103\\_01.pdf](http://www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241-BOZEK/publikace/2006/2006_103_01.pdf)>
- [4] PŘIBYL, J. Použití lihobenzinových směsí k pohonu zážehových motorů. (Technická zpráva.) TÜV ÚVMV, s.r.o., Praha 2003.
- [5] POSPÍŠIL, M., ŠIŠKA, J., ŠEBOR, G. Biobutanol jako pohonná hmota v dopravě. Biom[online]. 23.5.2013. URL:  
<<http://biom.cz/upload/6e01d6d4c4835ec93cda508772f3bf6e/biobutanol-jako-pohonn-hmota-v-doprav.pdf>>
- [6] LAURIN, J. Butanol jako motorové palivo. *Alternativní energie*. Praha: České ekologické manažerské centrum, 2012, roč. 12, č. 3, s.38-39, ISSN 1212-1673.
- [7] THONGCHAI, S. Feasibility Study of Using High Butanol-Diesel Blends in Commonrail Engine. me.psu.ac[online]. 23. 5. 2013. URL:  
<[http://www.me.psu.ac.th/tsme/ME\\_NETT23/topic/file/E-AEC-011365.pdf](http://www.me.psu.ac.th/tsme/ME_NETT23/topic/file/E-AEC-011365.pdf)>
- [8] ES 97/68/ES. SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2004/26/ES ze dne 21. dubna 2004, kterou se mění směrnice 97/68/ES o sbližování právních předpisů členských států týkajících se opatření proti emisím plyných znečišťujících látek a znečišťujících částic ze spalovacích motorů určených pro nesilniční pojízdné stroje
- [9] LACH-NER. Bezpečnostní list butanolu[online]. 22. 5. 2013. URL:  
<[http://www.lach-ner.com/files/78-83-1\\_Iso-butanol\\_v2\\_CZ.pdf](http://www.lach-ner.com/files/78-83-1_Iso-butanol_v2_CZ.pdf)>